

**LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
DISTRIBUCIÓN BASADOS EN LA MATRIZ DE IMPEDANCIA DE BARRA.**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
DISTRIBUCIÓN BASADOS EN LA MATRIZ DE IMPEDANCIA DE BARRA.**

**AUTOR:  
ACUÑA CORREA DIEGO PATRICIO**

**DIRECTOR:  
RAMÓN ENRIQUE PÉREZ PINEDA**

**Quito, Junio 2017**

ACUÑA CORREA DIEGO PATRICIO

**LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
DISTRIBUCIÓN BASADOS EN LA MATRIZ DE IMPEDANCIA DE BARRA.**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



**Diego Patricio Acuña Correa** (Y'1990-M'01). Realizó sus estudios secundarios en la Unidad Educativa Iberoamericano. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución.

[dacuna@est.ups.edu.ec](mailto:dacuna@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Ramón Enrique Pérez Pineda** (Y'1981-M'11). Se graduó de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Antonio José de Sucre en Venezuela. MSC. Ciencias en Ingeniería Eléctrica, actualmente está trabajando para lograr su título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Es director de carrera de Ingeniería Electrónica - Electrónica y Automatización en la Universidad Politécnica Salesiana

[rperezp@ups.edu.ec](mailto:rperezp@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2017 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

### **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Ramón Enrique Pérez Pineda declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*Localización de Fallas en Sistemas Eléctricos de Distribución Basados en la Matriz de Impedancia de Barra*” realizado por Diego Patricio Acuña Correa, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Junio 2017



Ramón Enrique Pérez Pineda

Cédula de identidad: 0959948290

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Diego Patricio Acuña Correa, con documento de identificación N° 1721092219, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “Localización de Fallas en Sistemas Eléctricos de Distribución Basados en la Matriz de Impedancia de Barra ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Diego Patricio Acuña Correa

Cédula: 1721092219

Fecha: Junio 2017

## **INDICE GENERAL**

1. Introducción .....	2
2. Sistema Eléctrico de Distribución .....	3
2.1 Matriz de Impedancia.....	3
2.2 Fallas Eléctricas .....	4
2.3 Medidores Inteligentes .....	4
3. Metodología .....	5
3.1 Pseudocódigo: Localización de fallas .....	6
4. Análisis de Resultados .....	6
5. Conclusiones .....	10
6. Referencias .....	11
6.1 Estado del Arte .....	14

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Localización de fallas en Sistemas de Distribución .....	3
Figura 2. Corriente de falla por cada SFM, $Nfm$ .....	5
Figura 3. Sistema Eléctrico de Distribución del IEEE34 barras .....	7
Figura 4. Magnitud de Tensión RMS de pre-falla .....	7
Figura 5. Magnitud de Tensión RMS de falla monofásica en la fase A .....	7
Figura 6. Localización barra en falla (Barra 3).....	8
Figura 7. Exactitud de Localización de Fallas Monofásicas.....	8
Figura 8. Exactitud de Localización de Fallas Bifásicas.....	9
Figura 9. Exactitud de Localización de Fallas Bifásicas a Tierra .....	9
Figura 10. Exactitud de Localización de Fallas Trifásicas.....	10
Figura 11. Exactitud de Localización de Fallas .....	10

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Tipos de Fallas.....	4
Tabla 2. Tipos de Fallas en SED.....	4
Tabla 3. Distancia por clases de error Falla Monofásica .....	8
Tabla 4. Distancia por clases de error Falla Bifásica .....	9
Tabla 5. Distancia por clases de error Falla Bifásica – Tierra.....	9
Tabla 6. Distancia por clases de error Falla Trifásica.....	10
Tabla 7. Distancia por clases de error Tipos de Fallas .....	10
Tabla 8. Matriz de estado del arte.....	14
Tabla 9- Resumen e Indicadores del estado del arte .....	17

# LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN BASADOS EN LA MATRIZ DE IMPEDANCIA DE BARRA.

## Resumen

Este artículo propone un método de localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución basado en la matriz de impedancia de barra, la teoría de cortocircuito y medición inteligente haciendo uso de medidores inteligente. El método propuesto consiste en ubicar estos medidores en distintas barras a lo largo de sistema de distribución con el objetivo de obtener valores eficaces de tensión en estado de pre-falla y falla, dichas magnitudes al operar con la matriz de impedancia de barra obtienen la corriente de falla estimada por cada fase en cada barra. Estas corrientes sirven para obtener el coeficiente de localización de fallas, con ello se realiza un análisis comparativo determinando el coeficiente de menor valor que indicara la barra estimada en falla. El método ha sido estudiado en el troncal principal del IEEE de 34 barras, para todos los tipos de falla, con diferentes valores de resistencia de falla presentando resultados satisfactorios.

**Palabras Clave:** localización de fallas, sistema de distribución, matriz de impedancia, medidor inteligente del alimentador.

## Abstract

This paper proposes a method of locating faults in electrical distribution systems based on bar impedance matrix, short circuit theory and intelligent metering using smart metering. The proposed method consists in locating these metering systems in different bars along the distribution system in order to obtain effective voltage values in the pre-fault and fault state, these quantities when operating with the bar impedance matrix obtain the failure current estimated by each phase in each bar. These currents are used to obtain the fault localization coefficient, with which a comparative analysis is carried out, determining the coefficient of smaller value indicated by the estimated fault bar. The method has been studied in the primary principle of the IEEE of 34 bars, for all types of fault, with different values of failure resistance, presenting satisfactory results.

**Keywords:** fault location, distribution system, impedance matrix, Smart Feeder Meters.



## 1. Introducción

Las funciones de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) son generar, transmitir y distribuir energía eléctrica [1] de calidad, con el menor impacto ambiental, el mínimo número y duración de interrupciones de servicio que recae en la confiabilidad [2]. La confiabilidad de un SEP es un tema de gran interés dado que la energía no suministrada perjudica la calidad de vida de las personas y provoca grandes pérdidas económicas [3]. Pero por diversos factores un SEP no es cien por ciento confiable ya que se encuentra expuesto a varios eventos como pueden ser descargas atmosféricas, rotura de conductores, falla de aisladores, accidentes en líneas, falla en equipos [4], etc. Como consecuencia de ello se presentan interrupciones del servicio eléctrico que no pueden ser predecibles. La mayor parte de interrupciones del SEP se presentan en los Sistemas Eléctricos de Distribución (SED), que es un componente del SEP, ya que según [5] y [6] el 80% de las interrupciones se presentan en estos sistemas. Los SED son los encargados de suministrar, distribuir y comercializar la energía eléctrica a los centros de consumo [7], ya sean residenciales, comerciales o industriales [8]. Por tal motivo, es un tema importante localizar las fallas que se presenten en los SED y una vez ubicada la falla, esta debe de ser reparada de forma inmediata con la finalidad de restaurar el servicio. Dichas interrupciones de energía afectan los índices de confiabilidad y calidad [9] provocando pérdidas económicas para las empresas de distribución ya que el costo de energía no suministrada es elevado [10]. Estas

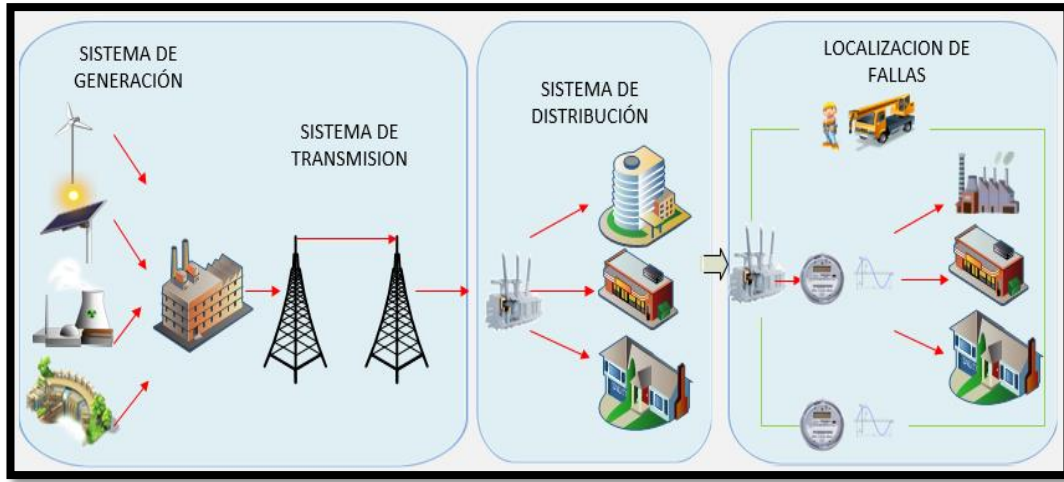
interrupciones son provocadas por cortocircuitos que en su mayoría son en líneas aéreas.

La localización de fallas en Sistemas Eléctricos de Transmisión (SET), se trata de utilizar las señales de corriente y tensión adquiridas en uno o ambos terminales de la línea [4], empleando métodos basados en la componente fundamental [4], componentes de alta frecuencia [11] y ondas viajeras [12]. Los SED presentan un problema más complejo ya que existen diversos factores que limitan la ubicación de las fallas, debido a que en estos sistemas existen distintos tipos de topologías, desequilibrio de cargas, naturaleza de la puesta a tierra, diferentes tipos y secciones de conductor (no homogéneos), líneas aéreas y subterráneas, etc. Dichos factores dificultan una modelación exacta del SED [13].

En un SED tradicional, la localización de fallas se realiza mediante la información proporcionada por el usuario que se ve afectado por la ausencia de servicio eléctrico, eso quiere decir, que no se conoce la ubicación exacta de la falla [14].

En la actualidad existen investigaciones que proponen mejorar los métodos tradicionales de localización de fallas, en su mayoría utiliza la medición que es adquirida en la subestación de distribución [15], como por ejemplo las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM, por sus siglas en inglés) [16], redes neuronales, análisis de señales, métodos híbridos [17], entre otros [18].

En este artículo se presenta una alternativa de localización de fallas en SED, basado en la matriz de impedancia de barra, utilizando la teoría de corto circuito y la medición



**Figura 1.** Localización de fallas en sistemas de distribución

Inteligente adquirida por los Smart Feeder Meter (SFM, por sus siglas en inglés), ubicados a lo largo del alimentador para calcular el coeficiente de menor valor con el fin de estimar en que barra se produjo la falla; con esto se pretende minimizar el tiempo de búsqueda, inspección y restauración del servicio, pronosticar fallas futuras que afecten a equipos y demanden más tiempo de reparación.

## 2. Sistema Eléctrico de Distribución

La energía que se genera en las centrales debe ser transportada hacia los usuarios que se encuentran alejados de éstas, para ello se debe elevar los niveles de tensión, con el fin de minimizar pérdidas técnicas, disminuir la corriente y alcanzar largas distancias, a través del SET se envía la energía a los SED que son los encargados de suministrar, distribuir y comercializar esta energía reduciendo los niveles de tensión para satisfacer los requerimientos de los usuarios [19].

A diferencia de los SET, los SED en su gran mayoría están constituidos por una topología de tipo radial, con redes monofásicas, bifásicas y trifásicas, por ende, cuando se realiza un análisis de SED se debe tomar en cuenta que pueden ser sistemas desbalanceados o balanceados [20].

### 2.1 Matriz de Impedancia

Para modelar un SED se puede emplear la matriz de admitancias de barras del sistema ( $Y_{bus}$ ), que permite conocer el estado del sistema [21]. Esta será dependiente de la topología de la red y del número de barras del sistema, por lo tanto, la dimensión de la  $Y_{bus}$ , será de  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de barras del sistema como se indica en (1).

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{(1,1)} & \cdots & Y_{(1,n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{(n,1)} & \cdots & Y_{(n,n)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Un SED presenta características de orden monofásicas, bifásicas y trifásicas, es decir existe un desbalance en el sistema, por lo tanto, se debe analizar por cada fase, eso quiere decir que cada componente de  $Y_{bus}$  será una sub-matriz de  $3 \times 3$ . Como se indica en (2).

$$Y_{bus}^{abc} = \begin{bmatrix} Y_{(a,a)} & Y_{(a,b)} & Y_{(a,c)} \\ Y_{(a,b)} & Y_{(b,b)} & Y_{(b,c)} \\ Y_{(a,c)} & Y_{(b,c)} & Y_{(c,c)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dónde:

$a, b, c$ ; son las fases del sistema.

$aa, bb, cc$ : son las Admitancias propias de cada fase

$ab, ac, bc$ : son las Admitancias compartidas entre fases.

La construcción de la Matriz de Impedancias de Barras del Sistema ( $Z_{bus}$ ), presenta un proceso de elaboración más minucioso ya que abarca información vinculada con la distribución de corrientes en todo el sistema utilizando algoritmos muy complejos a diferencia de la  $Y_{bus}$  que se elabora por inspección [22]. Por lo tanto, se recomienda modelar la  $Z_{bus}$  partiendo de la  $Y_{bus}$ , como se indica en (3). Obteniendo la expresión (4).

$$Z_{bus} = [Y_{bus}]^{-1} \quad (3)$$

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} Z_{(1,1)} & \cdots & Z_{(1,n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{(n,1)} & \cdots & Z_{(n,n)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2.2 Fallas Eléctricas

Las fallas que se pueden presentar en los SED pueden ser de tipo asimétricas o simétricas y serie o paralelo.

Tabla 1. Tipos de Fallas [23].

Nº. Falla	Tipo de Falla	Descripción
Falla 1	Monofásica a Tierra	Falla en la fase A
Falla 2		Falla en la fase B
Falla 3		Falla en la fase C
Falla 4	Bifásica	Falla entre las fases AB
Falla 5		Falla entre las fases BC
Falla 6		Falla entre las fases CA
Falla 7	Bifásica a Tierra	Falla entre las fases AB a tierra
Falla 8		Falla entre las fases BC a tierra
Falla 9		Falla entre las fases CA a tierra
Falla 10	Trifásica	Falla entre las fases ABC
Falla 11	Trifásica a Tierra	Falla entre las fases ABC a tierra

Las fallas de tipo serie se presentan cuando las líneas sufren una ruptura sin involucrar a tierra. Las de tipo paralelo suceden cuando existe un cortocircuito entre fases o a tierra [10] [23]. Las fallas simétricas son ocasionadas en su mayoría por aspectos atmosféricos o

climáticos provocando cortocircuitos trifásicos que son los que más afectan al sistema [24] [25]. En la tabla 1 se presenta los 11 tipos de fallas.

Las fallas que se presentan con mayor frecuencia son las de tipo paralelo; estas fallas pueden darse entre fases o entre fase y a tierra. Las fallas más comunes que se presentan en los SED se detallan en la Tabala2.

Tabla 2. Tipos de Fallas en SED

Ítem	Tipo de Falla
1	Monofásica a tierra
2	Bifásica a tierra
3	Bifásica
4	Trifásica

Estas fallas se pueden clasificar y cuantificar por el porcentaje de ocurrencia ya que según [26] del 70 al 80% de fallas son de carácter monofásica a tierra, del 10 al 17% son de índole bifásica a tierra, fallas bifásicas con una frecuencia de ocurrencia del 8 al 10% y por último del 2 al 3% de carácter trifásica.

Cuando se produce una falla por cortocircuito la corriente incrementa y esto provoca una caída de tensión en cada barra del SED. Para el cálculo de la corriente de falla se puede estimar basándose en la ley de ohm [27] [28] la cual se describe en (5):

$$V = I * Z \quad (5)$$

Dónde:

$I$ : Corriente

$V$ : Tensión

$Z$ : Impedancia

## 2.3 Medidores Inteligentes

Los SFM son dispositivos que se encargan de monitorear y sensar el estado del SED, estos SFM obtienen un valor de tensión eficaz o RMS [29] pudiendo medir la tensión de pre-falla y falla [30]. Con el objetivo de obtener una mayor exactitud del estado del

sistema, los SFM pueden ser ubicados en distintas barras [31]. Para estimar la corriente de falla en cada barra del SED, se aprovecha la relación de tensión antes y durante la falla que la proporciona los SFM, la impedancia está relacionada a la resistencia y reactancia propias de cada una de las fases del SED [32]. Obteniendo la expresión que se indica en (6).

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{(1,1)} & \cdots & Z_{(1,n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{(n,1)} & \cdots & Z_{(n,n)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 3. Metodología

El método propuesto de localización de fallas en SED se basa en el modelado del sistema utilizando la matriz de impedancia de barra y la medición inteligente del sistema apoyado en la tecnología de los SFM, los cuales se encuentran ubicados en diferentes barras de forma randomica a lo largo de la SED, estos medidores son los que proporcionaran los valores de tensión RMS en estado de pre-falla ( $V_i^{(abc)pf}$ ) y falla ( $V_i^{(abc)f}$ ). El cálculo de la desviación de tensión ( $\Delta V_i^{(abc)}$ ), se realiza operando la diferencia entre la tensión de pre-falla y falla como se detalla en (7).

$$\Delta V_i^{(abc)} = V_i^{(abc)pf} - V_i^{(abc)f} \quad (7)$$

El sufijo  $i$  corresponde a la barra donde se encuentra instalado el SFM, el superíndice  $a, b, c$  corresponde a cada fase, de esta manera  $V_i^{(abc)f}$  y  $\Delta V_i^{(abc)pf}$  son matrices de orden  $3 \times 1$ . Como resultado de este se tendrá la misma cantidad de desviaciones de tensión  $\Delta V_i^{(abc)}$  que la cantidad de SFM instalados en el sistema.

Para el cálculo de la corriente de falla en cada barra del sistema se utiliza la matriz de impedancia de barra, y las

desviaciones de tensión anteriormente calculada como se muestra en (8).

Restricción:  $i \neq k$

$$I_{falla_{ik}}^{(abc)} = \left( Z_{ik}^{(abc)} \right)^{-1} \cdot \Delta V_i^{(abc)} \quad (8)$$

$I_{falla_{ik}}^{(abc)}$  Es la corriente de falla calculada;

$Z_{ik}^{(abc)}$  Es una sub-matriz de orden  $3 \times 3$  de la  $Z_{bus}$ , donde  $k$  es la barra que se considera en falla. Por lo tanto, se tendrá el mismo número de corrientes de falla estimadas por cada barra que el número de SFM instalados en el sistema ( $N_{fm}$ ), como se aprecia en la figura 2.

Consecuentemente, si la falla efectivamente ocurrió en la barra  $k$ , las corrientes de falla estimadas serán prácticamente las mismas y será similar a la real. Por lo contrario, si la falla ocurrió en cualquier otra barra las corrientes de falla estimadas tendrán un margen de error.

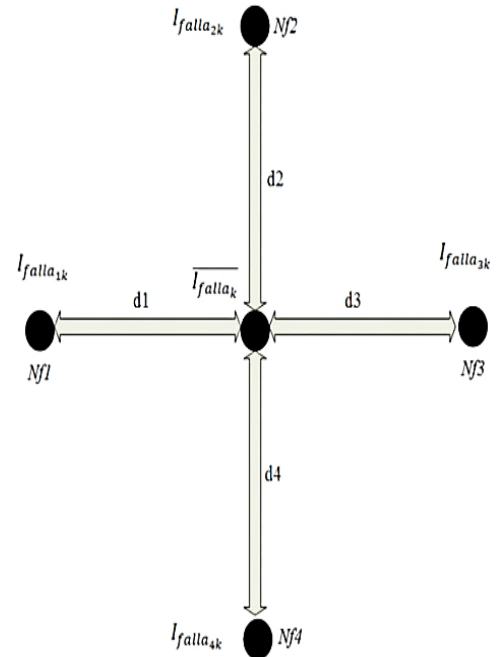


Figura 2. Corriente de falla por cada SFM,  $N_{fm}$

Para el cálculo de coeficiente de localización de fallas se requiere la corriente de falla por fases ( $ph$ ); de tal manera se obtiene el promedio de corriente de falla estimada por fases; como se indica en (9).

$$\overline{I_{falla_k}^{ph}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{fm}} I_{ik}^{ph}}{N_{fm}} \quad (9)$$

$$d_{ik}^{ph} = \left| I_{falla_{ik}}^{ph} - \overline{I_{falla_k}^{ph}} \right| \quad (10)$$

$$\delta_k = \sum_{ph} \sum_{i=1}^{a,b,c N_{fm}} d_{ik}^{ph} \quad (11)$$

La solución de localización de fallas en SED basado en la matriz de impedancia de barra consiste en calcular el coeficiente de cada una de las barras del sistema ( $\delta_k$ ), como se indica en (10) y (11) con el fin de comparar y ubicar el coeficiente de menor valor que será la barra estimada en falla.

### 3.1 Pseudocódigo: Localización de fallas

El pseudocódigo de localización de fallas en SED basado en la matriz de impedancia de barra describe el proceso paso a paso desde la construcción de la matriz de impedancia de Barra hasta la estimación de la barra en falla.

---

#### Pseudocódigo de localización de fallas en SED basado en la matriz de impedancia de barra

---

**Paso 1:**

**Inicio**

**Paso 2:**

Construcción de la Matriz de impedancia de barra  $Z_{bus}$ .

**Paso 3:**

Ubicación de SFM en diferentes barras de la SED.

**Paso 4:**

**Declaración de Variables:**

**Inicio**

nbarras; rmin; barra; rmax;  
rpas.

**Fin**

**Paso 5:**

**Establecer valores**

nbarras=34

barra=monofásica; bifásica;  
trifásica

rmin=5

rmax=30

rpas=5

**Paso 6:**

Lectura de magnitud de tensión de pre-falla y falla de los SFM.

**Paso 7:**

Calculo de desviación de Tensión  $\Delta V_i^{(abc)}$  por cada SFM usando (7).

**Paso 8:**

Estimación de la corriente de falla en cada barra del sistema  $I_{falla_{ik}}^{(abc)}$  usando SFM, y la matriz de impedancia de barra  $Z_{bus}$  usando (8).

**Paso 9:**

Calculo del promedio de corriente de falla por fases por cada barra del sistema  $\overline{I_{falla_k}^{ph}}$  usando (9).

**Paso 10:**

Cálculo del índice de localización de falla por cada barra del sistema  $\delta_k$  usando (12).

**Paso 11:**

Gráfica, representativa, con el índice de menor valor asociada a la barra estimada en falla.

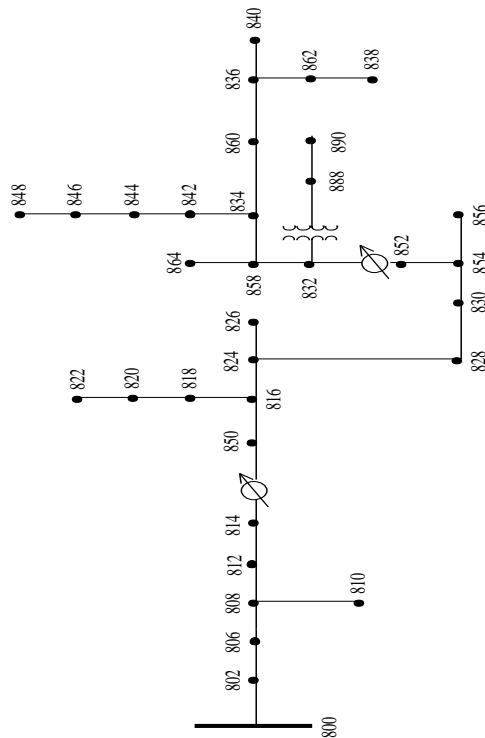
**Paso 12:**

**Fin**

---

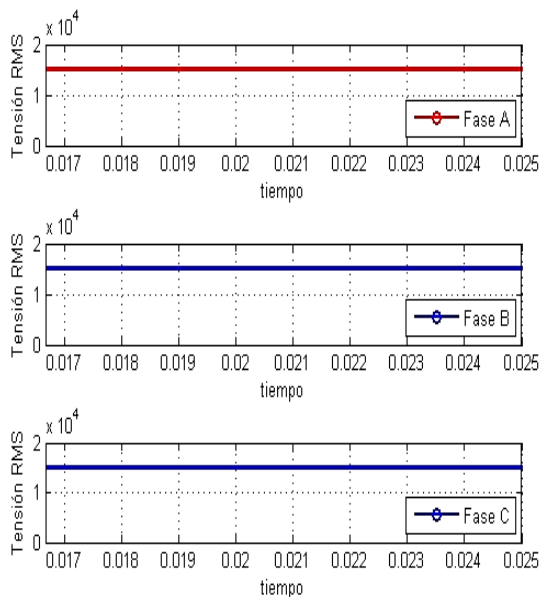
## 4. Análisis de Resultados

Para analizar el método propuesto de localización de fallas en SED basado en la matriz de impedancia de barra se ha utilizado el modelo del alimentador principal del IEEE de 34 barras. Este circuito consta con todas las características idóneas de un SED real, ya que está compuesto por barras de carácter monofásico, bifásico, trifásico, desbalance de cargas, etc. Como se indica en la figura 3. Por lo tanto, es ideal para el análisis propuesto.



**Figura 3.** Sistema eléctrico de distribución del IEEE34 barras

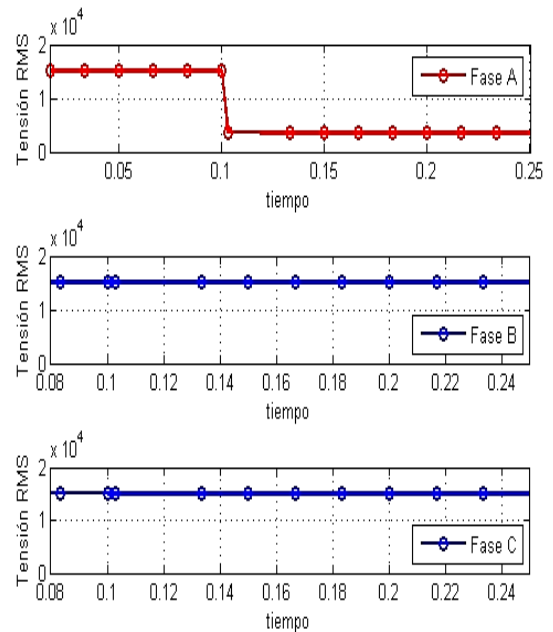
Para modelar y simular el sistema del alimentador principal del IEEE de 34 barras anteriormente mencionado en la figura 3. Se ha utilizado el software ATPDraw®, adicionando los SFM ubicados en diferentes barras del sistema, que proporcionan las magnitudes de tensión RMS en estado de pre-falla y en falla como se indica en la figura 4 y figura 5 respectivamente.



**Figura 4.** Magnitud de tensión RMS de pre-falla

En la figura 4 se puede apreciar la tensión RMS de pre-falla que son adquiridas por los SFM y simuladas en el software, y vienen a ser semejantes tanto en las fases A, B y C, ya que en estado de pre-falla existe una pequeña variación en la tensión de cada fase.

En la figura 5 se puede visualizar una falla monofásica en la fase A, la misma que adquiere una considerable caída de tensión ya que se produce un incremento de corriente de falla. En las fases B y C no se produce una variación ya que al existir una falla monofásica no hay un cambio brusco de tensión y corriente en las fases que no están involucradas en falla.



**Figura 5.** Magnitud de tensión RMS de falla monofásica en la fase A

Modelado y simulado el circuito del alimentador principal del IEEE de 34 barras, se realiza la vinculación ATPDraw® y Matlab® con la finalidad de obtener las magnitudes de pre-falla y falla que son necesarias para el modelo de localización de fallas; este proceso de vinculación se realiza para cada uno de los tipos de fallas que se mencionan en la Tabla 1, en cada barra con diferente resistencia de falla. Una vez obtenido las magnitudes de pre-falla, falla y almacenados en Matlab® se procede a

realizar el modelo de localización de fallas en SED basado en la matriz de impedancia de barra que se mencionó en la sección 3 y se describe paso a paso en el pseudocódigo, obteniendo los siguientes resultados.

En la figura 6 se muestra la representación del valor de coeficiente de localización de fallas en SED  $\delta_k$ ; para cada barra del sistema. Para esta ilustración se ha simulado una falla en la barra 3, obteniendo el coeficiente  $\delta_k$  de menor valor en la barra 3.

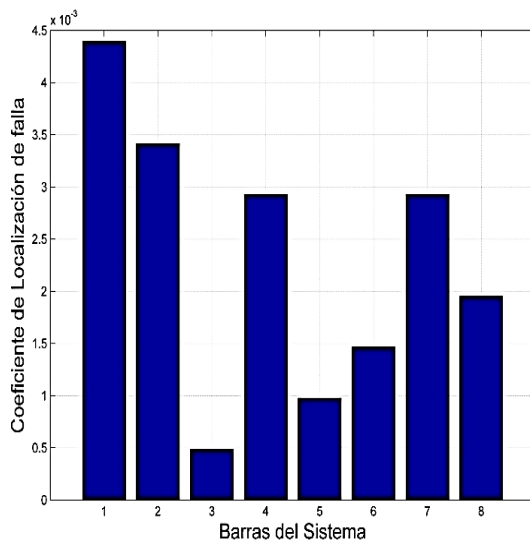


Figura 6. Localización barra en falla (barra 3)

Para obtener la exactitud del método se ha realizando la relación entre la distancia de falla real y la distancia estimada de falla calculada; por lo tanto, se tendrá un margen de error, categorizado por clases; Clase 1 representa el porcentaje de barras que acertaron en la localización de la falla. Clase 2 constituye el porcentaje de barras cuya distancia de error es mínima y está en el rango de 121 a 240 metros. Clase 3 es el porcentaje de barras cuya distancia de error es aceptable y está en el rango de 241 a 360 metros. Clase 4 forman el porcentaje de barras con distancia de error entre 361 a 480 metros y por último el porcentaje de barras con una distancia de error significativa y superior a 481 metros.

El método se ha estudiado con diferente resistencia de falla de 5 a 30Ω en pasos de 5Ω; con ello se puede probar la exactitud del método por resistencia de falla.

En la figura 7, se puede apreciar la tendencia de la exactitud del método en fallas monofásicas, presentando resultados satisfactorios ya que en todas las resistencias de falla exhibe un alto porcentaje de barras en falla localizadas, así como un pequeño porcentaje de barras en falla con clase 5, además se puede evaluar que existe un mínimo margen de diferencia entre los diferentes valores de resistencia. La tabla 3 se representa el porcentaje de exactitud por clases y por cada valor de resistencia de falla.

Tabla 3. Distancia por clases de error Falla Monofásica

FALLAS MONOFASICAS							
Clase	Dist. Error	Rf 5 (%)	Rf 10 (%)	Rf 15 (%)	Rf 20 (%)	Rf 25 (%)	Rf 30 (%)
1	0	54.2	33.3	54.2	41.7	50.0	37.5
2	121-240	16.7	20.8	12.5	25.0	20.8	25.0
3	241-360	4.2	20.8	12.5	16.7	8.3	20.8
4	361-480	16.7	20.8	16.7	8.3	12.5	8.3
5	>480	8.3	4.2	4.2	8.3	8.3	8.3

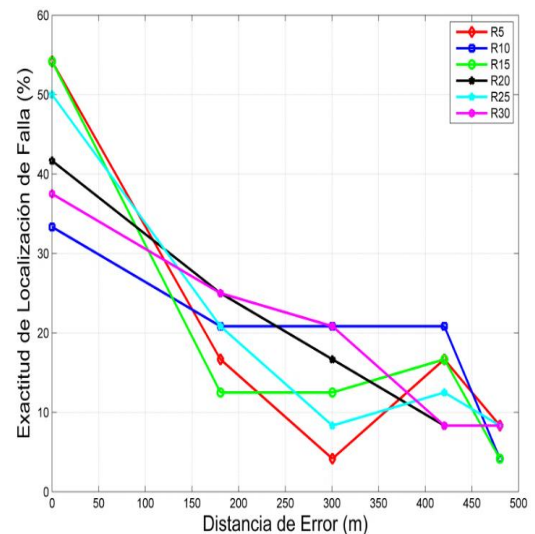


Figura 7. Exactitud de localización de fallas monofásicas



En la figura 8, se presenta la exactitud del método en fallas bifásicas, consiguiendo un alto porcentaje de barras en falla localizadas, además un pequeño porcentaje de barras en falla con distancia de error significativa para los diferentes valores de resistencia de falla, así también se puede apreciar que para los diferentes valores de resistencia de falla la tendencia de la exactitud del método es similar. En la tabla 4, se representa cuantitativamente la exactitud del método en fallas bifásicas.

Tabla 4. Distancia por clases de error Falla Bifásica

FALLAS BIFASICAS							
Clase	Dist. Error	Rf 5 (%)	Rf 10 (%)	Rf 15 (%)	Rf 20 (%)	Rf 25 (%)	Rf 30 (%)
1	0	41.7	54.2	37.5	37.5	37.5	50.0
2	121-240	25.0	29.2	29.2	12.5	37.5	29.2
3	241-360	25.0	12.5	20.8	20.8	8.3	8.3
4	361-480	4.2	0.0	8.3	12.5	12.5	12.5
5	>481	4.2	4.2	4.2	16.7	4.2	0.0

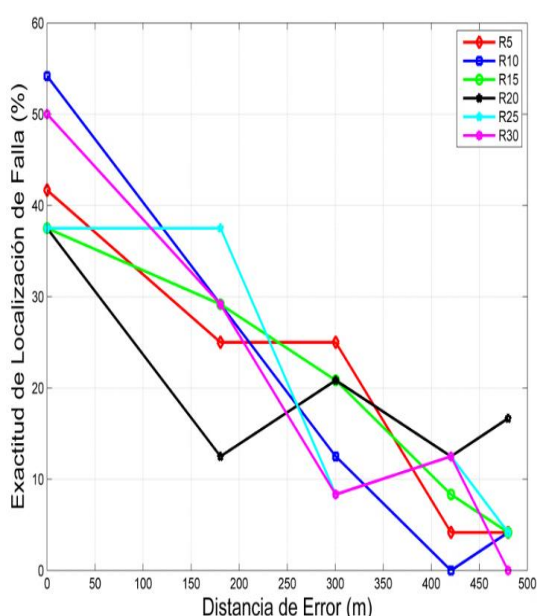


Figura 8. Exactitud de localización de fallas bifásicas

Para fallas bifásicas a tierra se presenta la exactitud del método en la figura 9, obteniendo en su mayoría un porcentaje de barras en falla

localizadas, así también se puede apreciar que existe una significativa variación en la tendencia por cada valor de resistencia de falla. En la tabla 5 se puede valorar el porcentaje por cada tipo de resistencia de falla.

Tabla 5. Distancia por clases de error Falla Bifásica – Tierra

FALLAS BIFASICAS - TIERRA							
Clase	Dist. Error	Rf 5 (%)	Rf 10 (%)	Rf 15 (%)	Rf 20 (%)	Rf 25 (%)	Rf 30 (%)
1	0	58.3	33.3	50.0	62.5	50.0	41.7
2	121-240	25.0	33.3	20.8	8.3	33.3	25.0
3	241-360	0.0	12.5	12.5	16.7	8.3	8.3
4	361-480	16.7	12.5	12.5	12.5	4.2	20.8
5	>481	0.0	8.3	4.2	0.0	4.2	4.2

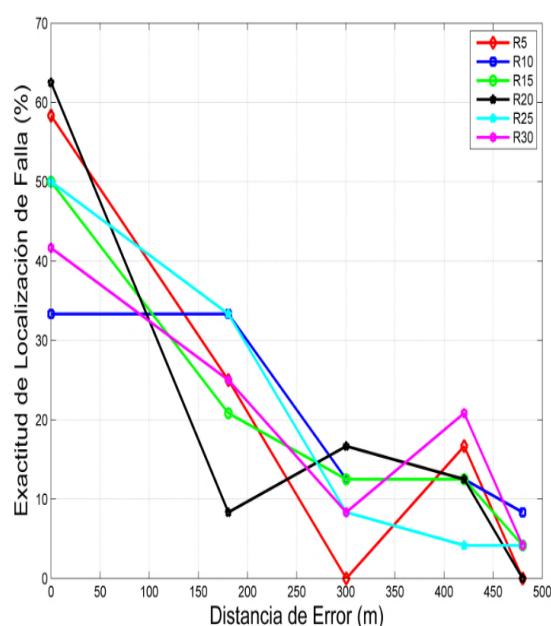


Figura 9. Exactitud de localización de fallas bifásicas a tierra

En la figura 10, se presenta los resultados obtenidos en fallas de carácter trifásico, presentando un alto porcentaje de barras en falla localizadas, igualmente se puede apreciar un porcentaje despreciable de barras en falla con de distancia de erros de clase 5. La tendencia de la exactitud para los diferentes valores de resistencia es similar. En la tabla 6 se presenta cuantitativamente la exactitud del método.



Tabla 6. Distancia por clases de error Falla Trifásica

FALLAS TRIFASICAS							
Clase	Dist. Error	Rf 5 (%)	Rf 10 (%)	Rf 15 (%)	Rf 20 (%)	Rf 25 (%)	Rf 30 (%)
1	0	62.5	68.8	37.5	31.3	50.0	50.0
2	121-240	12.5	6.3	18.8	31.3	31.3	37.5
3	241-360	6.3	6.3	25.0	12.5	0.0	0.0
4	361-480	12.5	12.5	18.8	25.0	18.8	12.5
5	>481	6.3	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0

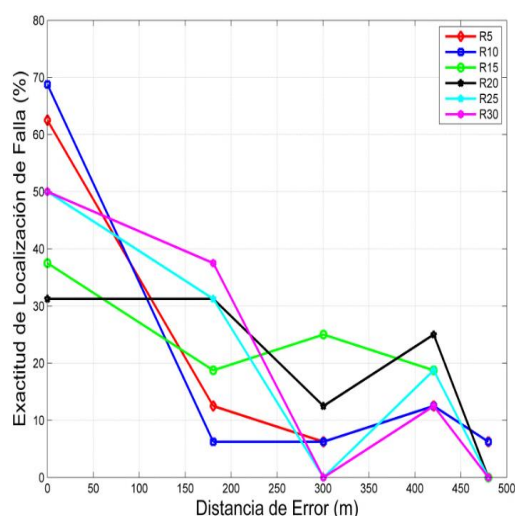


Figura 10. Exactitud de localización de fallas trifásicas

Con el fin de conocer la exactitud del método propuesto se realiza un análisis comparativo por tipo de falla, consiguientemente, se puede conocer en qué tipo de falla el método propuesto es más confiable. En la figura 11 se puede ultimar que existe una mayor exactitud en fallas de tipo trifásica y bifásica a tierra con valores muy similares, así como también se puede analizar que la diferencia entre los resultados obtenidos en fallas monofásicas, bifásicas, no presenta una gran diferencia y todos los tipos de falla siguen similar tendencia. Por lo tanto, se puede finiquitar que el método propuesto presenta resultados satisfactorios para todos los tipos de falla.

Tabla 7. Distancia por clases de error Tipos de Fallas

FALLAS BIFASICAS - TIERRA					
Clase	Dist. Error	1Ø (%)	2Ø (%)	2Ø-Tierra (%)	3Ø (%)
1	0	45.1	43.1	49.3	50.0
2	121-240	20.1	27.1	24.3	22.9
3	241-360	13.9	16.0	9.7	8.3
4	361-480	13.9	8.3	13.2	16.7
5	>481	6.9	5.6	3.5	2.1

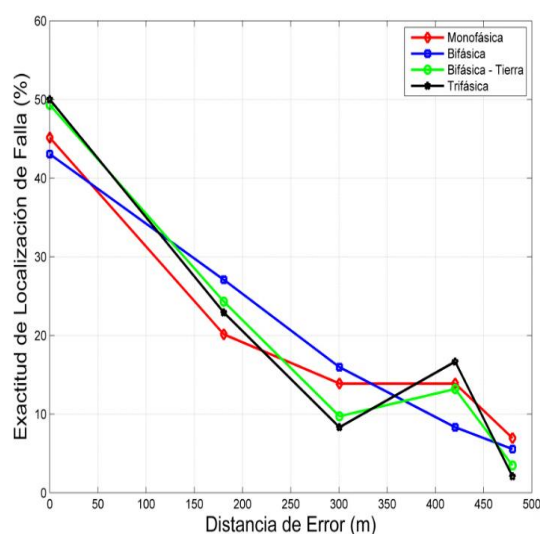


Figura 11. Exactitud de localización de fallas

## 5. Conclusiones

En el presente artículo se presentó una alternativa de localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución con el uso de la matriz de impedancia de barra, y medición inteligente del alimentador. El método ha sido probado en diferentes escenarios, con diferentes valores de resistencia de falla, presentando resultados con un margen de error en fallas monofásicas de 4.2 a 8.3%. En fallas bifásicas de 0 a 16.7%. En fallas bifásicas a tierra de 0 a 4.2%. En fallas trifásicas y trifásicas a tierra de 0 a 6.3%. El método propuesto depende de la cantidad de medidores inteligentes del alimentador ya que, cuanto más cerca este el medidor de la falla la técnica será más exacta.

## 6. Referencias

- [1] S. Ramírez, *Redes de distribución de Energía*. 2009.
- [2] X. D. Shenxing Shi, Minxin Wu, "A Two-Phase Electric Quantity-Based Fault Location Algorithm for Power Distribution Systems," no. Ciced, p. 6, 2014.
- [3] P. Vásquez and Á. Vaca, "Methodology for Estimating the Cost of Energy not Supplied -Ecuadorian Case-," *Proc. 2012 6th IEEE/PES Transm. Distrib. Lat. Am. Conf. Expo. T D-LA 2012*, 2012.
- [4] T. S. M. Sachdev, R. DAS, "Determining locations of faults in distribution systems," *6th Int. Conf. Dev. Power Syst. Prot.*, vol. 1997, pp. 188–191, 1997.
- [5] W. W. J. Crozier, "Power Quality and Reliability Index Based on Customer Interruption," no. September, pp. 1998–2000, 1998.
- [6] H. Mohammadpour and R. Dashti, "A New Method Presentation for Fault Location in Power Transformers," vol. 5, no. 6, pp. 334–339, 2011.
- [7] R. P. J. Pareja, "Localización de Fallas en Sistemas Eléctricos de Distribución con Generación Distribuida Usando Máquinas de Soporte Vectorial," Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [8] H. Gharavi and R. Ghafurian, "Smart grid: The electric energy system of the future," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 917–921, 2011.
- [9] L. Xu, M. Y. Chow, and L. S. Taylor, "Data mining and analysis of tree-caused faults in power distribution systems," *2006 IEEE PES Power Syst. Conf. Expo. PSCE 2006 - Proc.*, pp. 1221–1227, 2006.
- [10] J. J. Mora-Flórez, "Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el modelo y métodos basados en el conocimiento," p. 151, 2006.
- [11] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, and T. Sakaguchi, "A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part II - Laplace Transform Method," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, no. 3, pp. 564–573, 1982.
- [12] G. B. Ancell and N. C. Pahalawaththa, "Maximum Likelihood Estimation of Fault Location on Transmission Lines Using Travelling Waves," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 2, pp. 680–689, 1994.
- [13] I. D. Serna-Suarez, C. D. Ferreira-Sequeda, S. a. Martinez-Gutierrez, M. F. Suarez-Sanchez, and G. Carrillo-Cacedo, "Impact of static load models on the power distribution fault location problem," *2010 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am.*, pp. 706–711, 2010.
- [14] S. Bhattacharya, "Fault detection on a ring-main type power system network using artificial neural network and wavelet entropy method," pp. 1032–1037, 2015.
- [15] G. Morales-España, J. Mora-Flórez, and H. Vargas-Torres, "Fault location method based on the determination of the minimum fault reactance for uncertainty loaded and unbalanced power distribution systems," *2010 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am. T D-LA 2010*, pp. 803–809, 2011.

- [16] R. Pérez and C. Vásquez, "Fault Location in Distribution Systems with Distributed Generation Using Support Vector Machines and Smart Meters," pp. 0–5, 2016.
- [17] J. Mora, M. Granada, and L. Marín, "Los métodos de representación del conocimiento en inteligencia artificial y su integración en sistemas híbridos de localización de fallas," *Tecnura*, vol. 9, no. 17, pp. 98–109, 2005.
- [18] A. Bedoya-Cadena, C. Orozco-Henao, and J. Mora-Florez, "Single phase to ground fault locator for distribution systems with distributed generation," *2012 Sixth IEEE/PES Transm. Distrib. Lat. Am. Conf. Expo.*, pp. 1–7, 2012.
- [19] R. P. D. Criollo, "Localización de Fallas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando Generación Distribuida y Basado en Métodos Algorítmicos," Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2016.
- [20] R. P. F. Pabón, "Diagnóstico de Fallas en Sistemas Eléctricos de Distribución Mediante la Transformada de Wavelet," Universidad Politécnica Salesiana, 2016.
- [21] C. M. C. Florentin and M. R. Gonz, "Formación y alteración de la matriz de admitancia nodal . Técnica de sobreposición de redes .," *Fac. Politécnica - UNE*.
- [22] F. Aboytes, *Analisis de Sistemas de Potencia Aboytes*, Primera. Monterrey, 1990.
- [23] R. Camacho and R. Pérez, "Localización de Fallas en Redes de Distribución Eléctrica por Sensado Comprimido (Compressive Sensing)." Quito, 2017.
- [24] F. Gonzalez, "Fallas Asimétricas Ejemplo j p de Calculo de Corrientes de Fallas A i t i Asimetricas," 2008.
- [25] R. Perez, "Técnicas Para la Localización de Fallas en Sistemas Aéreos Radiales de Distribución de Energía Eléctrica," no. April 2013.
- [26] S. Kumar and M. Kumar, "Distribution System Faults Classification And Location Based On Wavelet Transform," *Int. J. Adv. Comput. Theory Eng.*, no. 4, pp. 86–91, 2013.
- [27] F. C. L. Trindade and W. Freitas, "Low Voltage Zones to Support Fault Location in Distribution Systems With Smart Meters," pp. 1–10, 2016.
- [28] I. Kim and R. G. Harley, "A Study on Power-Flow and Short-Circuit Algorithms Capable of Analyzing the Effect of Load Current on Fault Current Using the Bus Impedance Matrix," pp. 0–2, 2016.
- [29] F. C. L. Trindade, S. Member, W. Freitas, and J. C. M. Vieira, "Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters," no. February, pp. 251–260, 2014.
- [30] T. Baldwin, D. Kelle, J. Cordova, and N. Beneby, "Fault locating in distribution networks with the aid of advanced metering infrastructure," *2014 Clemson Univ. Power Syst. Conf. PSC 2014*, pp. 1–8, 2014.
- [31] T. Solvang, L. Aleixo, and H. Seljeseth, "Power Quality Measurement Capabilities of ' Smart ' Energy Meters," no. April, pp. 695–699, 2010.
- [32] A. A. G. E.B. Makram, M.A. Bou-Rabee, "Three-Phase Modeling of Unbalanced Distribution Systems during

Open Conductors and/or Shunt Fault Conditions Using the Bus Impedance Matrix,” *Electr. Comput. Eng. Dep.*, vol. 13, pp. 173–183, 1987.